

73.232
540

晶闸管无换向器电机

许大中 编著

科 学 出 版 社

1984

内 容 简 介

晶闸管无换向器电机是七十年代迅速发展起来的一种新型调速电机。在国外已得到了广泛应用。本书系统地论述了这种电机的原理、特性和应用。全书共分十章。前四章介绍无换向器电机的构成、基本原理、工作特性及其用途。第五章介绍了这种电机的性能分析。第六至第九章论述了电机、交流器及其控制系统的设计。第十章介绍了无换向器电机的调试方法。

本书可供从事电机、电力电子技术和电气传动自动控制方面的工程技术人员阅读，也可供高等院校有关专业高年级学生和教师参考。

晶 闸 管 无 换 向 器 电 机

许大中 主编

责任编辑：范铁夫

科学出版社出版

北京朝阳门内大街147号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1984年8月第 一 版 开本：787×1092 1/32

1984年8月第一次印刷 印张：13 7/8

印数：0001—7,300 字数：309,000

统一书号：15031·588

本社书号：3645·15—5

定价：2.15元

目 录

前言	vi
常用符号表	viii
第一章 概述	1
第一节 无换向器电机的发展	1
第二节 无换向器电机的特点及其广泛用途	6
第二章 无换向器电机的基本原理	11
第一节 无换向器电机的构成及其等效直流电机模型	11
第二节 无换向器电机的电磁转矩	19
第三节 无换向器电机的换流问题	25
2-3-1 电容强迫换流	25
2-3-2 反电势自然换流	29
2-3-3 电源换流	33
2-3-4 电流断续法换流	35
2-3-5 由电流断续法换流到反电势换流的过渡	38
2-3-6 变压器电势脉冲换流技术	39
2-3-7 门极关断晶闸管GTO的应用	42
第三章 无换向器电机的基本关系式和基本特性	43
第一节 无换向器直流电机的基本关系式	43
3-1-1 电源电压与直流电压之间的关系式	44
3-1-2 直流电压和电机电压之间的关系	47
3-1-3 电压和电机转速之间的关系	47
3-1-4 电流关系式和电磁转矩	48
3-1-5 换流重叠角 μ 的计算	52
第二节 无换向器电机的同步机分析法	53
3-2-1 无换向器电机的矢量图	54

3-2-2 无换向器电机的电磁转矩	57
3-2-3 功率因数	60
第三节 无换向器电机过载能力问题的初步分析	61
第四章 无换向器电机的运行方式	66
第一节 无换向器电机作电动机运行	66
4-1-1 无换向器电动机及其控制系统的基本构成	67
4-1-2 无换向器电机的特点	75
第二节 无换向器电机变频电源和多机协同调速系统	77
4-2-1 无换向器电机用作电机试验站变频电源	78
4-2-2 无换向器电机多机协同调速系统	85
4-2-3 无换向器电机的串接同步运行	88
第三节 无换向器电机作电力测功机运行	94
4-3-1 无换向器电机测功机的运行特点	95
4-3-2 测功机的转矩特性及其控制	97
第四节 无换向器电机原理在大型同步 电动机起动中的应用	102
第五章 无换向器电机的性能分析	112
第一节 无换向器电机的基本方程式	112
第二节 电流波形分析	124
5-2-1 电流连续时的情况	124
5-2-2 电流断续时的情况	128
第三节 电压波形分析	131
第四节 电机转矩的分析	136
第五节 换流极限问题	140
第六节 γ_0 自动调节时的工作特性	153
5-6-1 换流极限问题	154
5-6-2 电机转矩和机械特性	159
第七节 无换向器电机的过载能力分析	169
5-7-1 空载换流超前角 γ_0	173
5-7-2 电机的凸极性	174

5-7-3	换流电抗 X_c 和阻尼绕组	174
5-7-4	定子电阻的影响和电机低速运行时的过载能力	181
5-7-5	电机的短路比	194
5-7-6	励磁的影响	195
5-7-7	电枢反应的补偿	200
第六章 旋转电机的设计特点		209
第一节	爪极电机	210
6-1-1	爪极电机的结构形式	210
6-1-2	爪极电机的设计特点	212
第二节	凸极式同步电机的设计特点	219
6-2-1	阻尼绕组及换流电抗问题	219
6-2-2	补偿绕组的设计	222
第三节	无换向器电机采用六相 30° 相带绕组的优越性	224
第四节	无换向器电机的励磁系统	230
第七章 晶闸管变流器的设计		241
第一节	概述	241
第二节	主回路形式的选择	244
第三节	晶闸管元件的选择与保护	245
7-3-1	晶闸管电流定额的选择	245
7-3-2	晶闸管电压等级的选定	253
7-3-3	晶闸管的串并联问题	254
第四节	交流电抗器的选择	262
7-4-1	交流侧电抗器 L_c 的选择	262
7-4-2	阳极电抗器 L_a 的选用	263
第五节	平波电抗器 L_D 的选择	267
第六节	无换向器电机变流器的故障电流分析和保护措施	269
7-6-1	换流失败时的过电流	269
7-6-2	晶闸管的误开通和不开通故障	274
7-6-3	电源电压突然降低或丧失时的过电流	275

7-6-4	直流回路短路时的过电流	277
7-6-5	桥臂短路	278
7-6-6	快速熔丝的选择	280
第七节	变流器中的过电压及其保护	282
7-7-1	电源变压器原边跳闸时产生的过 电压及其抑制方法	283
7-7-2	载流子积蓄效应所引起的换流过电压	291
第八章	控制系统	295
第一节	无换向器电机的触发控制系统	295
8-1-1	转子位置检测系统	295
8-1-2	脉冲分配器	299
8-1-3	电压相位检测系统	304
8-1-4	γ 自动调节系统	310
8-1-5	触发系统	319
第二节	调速系统的构成	330
8-2-1	调节器的构成	330
8-2-2	无换向器电机的调速系统	332
第三节	逻辑控制系统	334
8-3-1	转矩极性鉴别器	334
8-3-2	逻辑电路	336
第四节	测速系统和断流控制系统	339
8-4-1	测速系统	339
8-4-2	换流时刻检测系统和高低速鉴别器	344
8-4-3	断流控制系统	347
第五节	交-交系统的同步运行检测回路	351
第九章	调速系统的动态性能和参数选择	354
第一节	无换向器电机的传递函数	354
9-1-1	无换向器电机的特殊性	354
9-1-2	无换向器电机的传递函数	358
第二节	调速系统设计	362

9-2-1	简单的速度反馈系统	362
9-2-2	调速系统的“最佳化”方法	364
9-2-3	无换向器电机调速系统的最佳化	376
9-2-4	无换向器电机转矩非线性特性的补偿	388
第三节	转矩特性调节系统的参数选择	391
第十章	无换向器电机的调试	403
第一节	转子位置检测器的调试	403
10-1-1	位置检测器调试的要求和方法	403
10-1-2	γ_0 角的整定	406
第二节	控制系统调试	407
10-2-1	一般检查	410
10-2-2	调速系统和触发控制系统的检查和调试	411
10-2-3	高低速鉴别电路和断流控制系统的调试	416
第三节	主回路通电调试和整机试验	418
10-3-1	主回路通电前调试	418
10-3-2	整机通电调试	420
10-3-3	起动试验	421
10-3-4	速度动态响应的调整	421
第四节	负载试验	422
参考文献		424

第一章 概 述

第一节 无换向器电机的发展

无换向器电机或称无整流子电机，是一种新型的无级变速电机，它由一台同步电机和一组逆变桥所组成（图1-1）。它具有直流电机那样良好的调速特性，但是由于没有换向器，因而可做成无接触式。具有结构简单、制造方便，不需要经常性的维护检修等优点，是一种理想的变速电机。早在本世纪三十年代，就有人开始对这种电机进行了系统的研究^[1]，

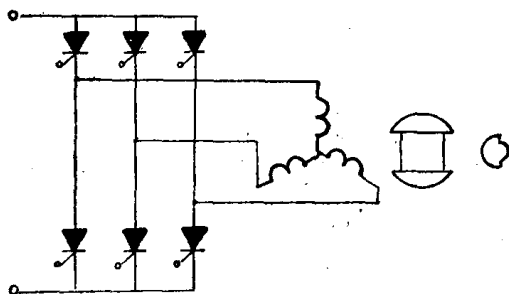


图1-1 无换向器电机的构成

并研制了一些试验样机。但当时由于大功率电子技术还处在初级发展阶段，能供使用的可控整流元件只是闸流管和汞弧整流器。这些元件体积庞大，维护使用不便，加之价格也相当昂贵，因之这种电机在三十年代只是处在实验室研究的阶段，而没有能够得到实际的推广使用。到本世纪的五十年代中期，随着大功率晶体管，特别是晶闸管（可控硅整流器）

的出现，才为这种电机的发展提供了现实的可能性。

无换向器电机根据它的容量不同，可分为晶体管电机和晶闸管电机二种。一般低压小容量的无换向器电机采用晶体管电机的方案，而容量较大的，通常都是晶闸管电机。由于晶体管和晶闸管不同，它的集电极负载电流和基极控制电流之间是直接相联系的，要关断晶体管，只要把基极电流下降到零，就能使集电极电流消失，所以在晶体管电机中不存在所谓逆变桥的换流问题。这不但可以简化电机的控制线路，而且能显著改善无换向器电机的性能。当然晶体管电机的控制功率所占的比重与晶闸管电机相比，相对地比较大些，但在小功率电机中，这并不是什么重要问题。现在国外一般在7.5千瓦以下的电机中多用晶体管；而在10千瓦以上的电机里，往往采用晶闸管。当然这个界限也是相对的，随着大功率晶体管生产水平的提高，这个界限也会有所提高。但是不论是晶体管电机还是晶闸管电机，其基本理论是相同的。本书着重研究晶闸管无换向器电机的问题。有关晶体管电机的一些特殊问题可参阅文献〔4〕。

晶闸管无换向器电机在原理上可以采用二种不同的方式。一种是所谓直流无换向器电机，又称无换向器电机交-直-交系统（图1-2）或直交系统。通常是把50赫的交流市电经可控整流变成直流，然后再由晶闸管逆变器转变成频率可调的交流电，供给同步电机以实现变频调速。当然这种电机也可以运行在公共的直流电网中，直流电源通过斩波器调压以后供给无换向器电机。电机的速度由斩波器来进行调节。另一种是所谓交流无换向器电机，又称无换向器电机交-交系统。它是利用晶闸管变频器直接把50赫的交流电转变成可变频率的交流电供给同步电机（图1-3）。

在实用上，交-交系统采用二种不同的工作方式，一种

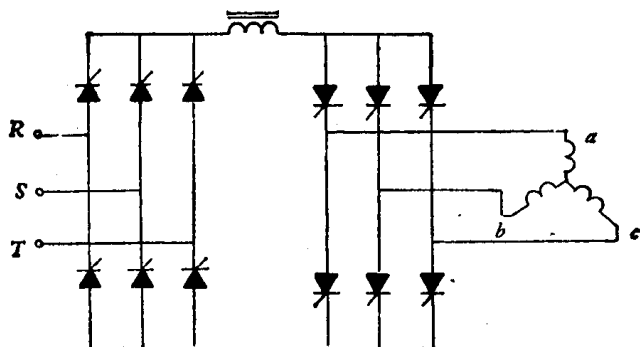


图1-2 无换向器电机交-直-交系统

是用所谓电流型变流器，它和常用的交-直-交系统一样，采用平波电抗器抑制电流纹波。这种系统电流不能快速变化，可以看作是一个电流源，所以输入到电机的交流电流的波形接近于方波。系统相对比较简单〔图1-3(a)〕。另一种是采用所谓电压型变流器的交-交系统〔图1-3(b)〕，它不用平波电抗器，允许电流比较快地进行变化，通过控制系统的调节作用，可以使流入电机的电流接近于正弦波，以保证电机具有较好的力能指标和较小的转矩脉动。但这种系统比较复杂。一般用在大容量的低速设备，如水泥厂的大型回转窑，球磨机等要求高起动转矩的无齿轮传动系统中。关于交-交系统的具体工作原理将在第七章中介绍。

直流无换向器电机与交流无换向器电机相比，它具有较强的适应性，既能经过可控整流装置用于交流电源，又能直接用于直流电源。它不但可以广泛地应用于各种工业部门，而且能用在电动汽车，电力牵引，船舶，潜艇等的驱动上，正是在这些用途上，无换向器电机更加显示出它的特殊优越性。此外，直流无换向器电机的系统比较简单，所用的晶闸管元件数量较少，元件的耐压要求也比较低，尤其是晶闸管

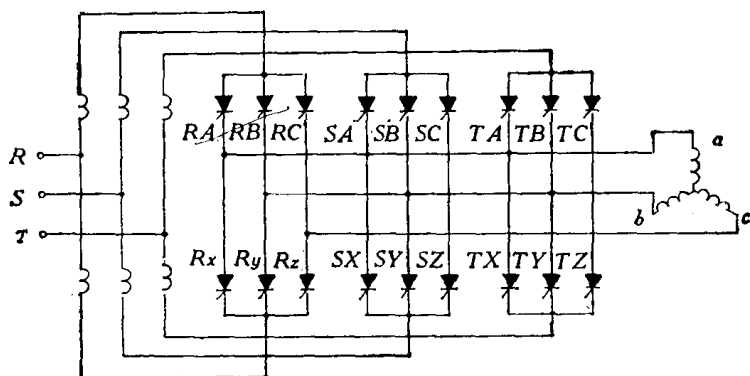


图1-3(a) 无换向器电机交-交系统(电流型变频器)

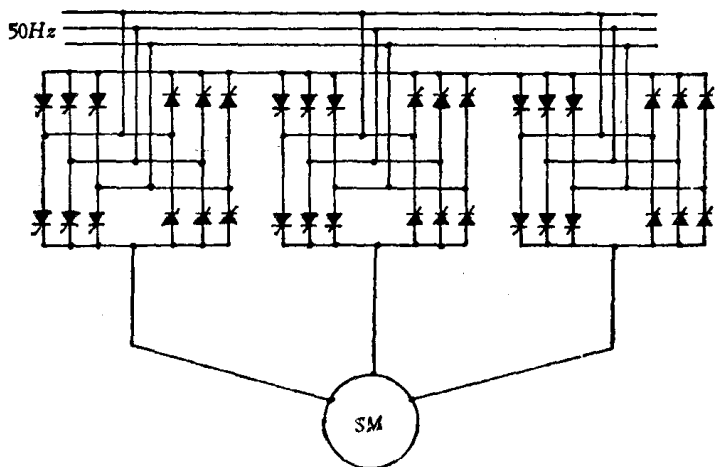


图1-3(b) 电压型变频器交-交系统

无换向器电机交-直-交系统的调压、调速控制系统和一般直流电机的调压、调速系统基本相同，这不但在电机及其控制系统的设计过程中，可以充分利用直流电机调速系统设计方面的丰富经验，而且在组织生产，推广使用和维护检修方面

均有许多方便之处。但在晶闸管直流无换向器电机中，由于逆变器的晶闸管是接在直流电源上，一旦导通，在直流电压作用下，不会自行关断。为了保证使通过晶闸管的电流能及时地从一相顺利地转换到另一相去，必须采用某些特殊的换流措施。在电机正常运行时，我们是利用逆变器的负载——同步电机的交流反电势来实现换流的；但在低速，特别是起动时，由于反电势为零，逆变器晶闸管的换流会发生困难。这是直流无换向器电机技术上的一个重要困难所在。而交流无换向器电机的变频器中，各晶闸管均直接接在交流电源上，当电源电压交变时，只要加在晶闸管两端的电压变负，晶闸管即能在一定时间内自行关断。所以无换向器电机交-交系统的晶闸管换流问题一般说来比直流无换向器电机容易解决。正因为这样，所以在无换向器电机的发展历史上首先得到成功应用的是无换向器电机交-交系统。它在六十年代末和七十年代初期即已进入实用阶段，而且容量很快就达到了单机1500千瓦左右的水平。在球磨机，水泥窑等大型低速设备的无齿轮传动中采用的由电压型变流器供电的交-交系统无换向器电机，容量很快就达到了6000—8000千瓦。

至于无换向器电机交-直-交系统，它实际推广使用较迟。只是到了七十年代中期，在其起动和低速时的换流问题得到完满解决以后，才获得了迅速的发展。近年来国外无换向器电机的发展中，特别是大型电机中，广泛采用了交-直-交系统。因为这种系统所用晶闸管元件少，耐压要求低，比较经济。

目前在国外，无换向器电机发展很快，它的应用范围十分广阔，特别是在日本，无换向器电机技术的发展处在比较领先的地位。这种新型的电机已相当普遍地应用于工业、运输、国防等各种部门的装备中。近年来，随着世界上能源危

机的出现，节能问题日益受到重视。现在不但许多新增的设备普遍要求能够调速节能，而且许多已在运行中的大型同步电动机，也纷纷要求配置适当的变流装置，使之变成无换向器电机调速运行。特别是近年来不少国家在积极兴建调节电网负荷的蓄能电站，所用大型扬水发电机组加一个适当的晶闸管变流器，按无换向器电机方式起动，具有十分明显的优点。这项技术已迅速得到推广。目前在日本 500 千瓦以下的无换向器电机早已组织系列生产，而且产品也在不断更新。容量较大的机组不断出现。如日本富士电机公司生产的 4700 千瓦无换向器电机早已投入运行；东芝公司生产的 3 千伏—5000 千瓦机组和 13.8 千伏—22.5 兆瓦的扬水发电机起动装置也已制成；由西德西门子公司为美国 Racoon 电站 425 兆伏安大型扬水发电机配套的 20 兆伏安无换向器电机方式起动装置已于 1979 年投入运行。不少新的技术，如无位置检测器系统 (OPS) 和换流剩余角保持恒定的控制方法等相继采用，显著改善了电机的工作特性。近年来可关断晶闸管 (GTO) 制造水平的提高，将为这种电机的发展提供新的可能性。

在我国，在无换向器电机的理论研究和产品试制方面也已做了大量的工作。浙江大学、天津电气传动设计研究所、上海电器科学研究所、南京航空学院、南京调速电机厂等单位在无换向器电机的研制中做了不少工作，为这一新型电机在我国的推广应用打下了基础，创造了良好的条件。

第二节 无换向器电机 的特点及其广泛用途

无换向器电机中由于用半导体换向器（逆变器）代替了传统的直流电机中机械接触式的换向器，使这种电机的应用

范围大大扩大。直流电机由于易于产生换向火花，以及换向器的机械强度和电刷磨损等都有问题，因而在运行中需有经常性的维护检修，对环境的要求也比较高，不适用于化工、矿山等周围环境中存在粉尘、腐蚀性气体和易燃、易爆气体的场合；即便应用在车辆牵引上，也感到维护检修不便。特别是由于换向问题的存在，直流电机无法做成高速大容量的机组。目前3000转/分左右的高速直流电动机所能做到的最大容量只有400千瓦左右，远远不能适应现代生产高速化化的要求。

此外，在现代直流电机的晶闸管四象限调速系统中，为了获得良好的动态特性，一般是采用控制电枢回路的电压和电流的办法来进行调速。在这种情况下要改变电机转矩的方向以实现制动和反转，就必须改变电机电枢回路电流的方向。由于晶闸管整流桥的单向导电性，单靠一个整流桥是无法适应的。所以在直流电机的快速四象限调速系统中，往往就不得不采用所谓“双桥反并联”的方案（图1-4）。二个不同方向的电流分别由各自的一个整流桥来承担。这样的系统当然比较复杂。

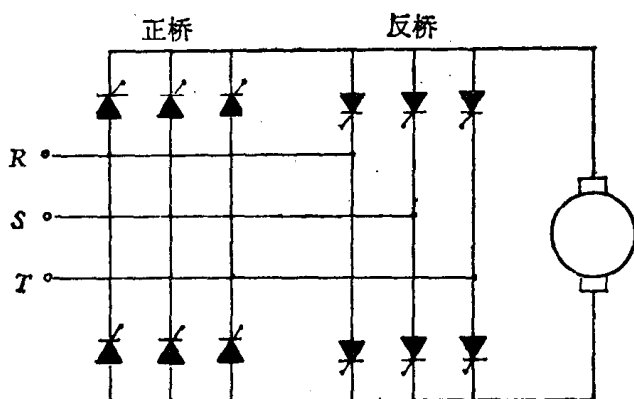


图1-4 直流电机的双桥反并联调速系统

采用无换向器电机可以从根本上克服一般直流电机的上述缺点。无换向器电机由于没有裸露的导电部分，没有经常发生火花的危险，而且可以做成无接触式，又能采用密闭防爆等结构，因而适用于如水泥厂、制糖厂、纺织厂、化工厂、矿山等环境比较恶劣的地方。无换向器电机由于没有需要经常维护检修的部件，特别适用于一些安装在人不可及的装备上，例如原子能工业、高空飞行器、深海潜水艇，以及某些安装在高山、海岛和其他偏僻地方的设备中。象近年来发展很快的海底勘探技术中应用的一种小型深海潜水艇，由于它可能工作在深达4000—5000米以上的深海中，那里有400个以上的大气压力。在这样高压环境中，唯一能够作为原动机使用的只有由蓄电池供电的无换向器电机能够胜任^[5]。

无换向器电机由于没有换向器这个薄弱环节，在结构上和同步电机相同，比较牢固，可以做成高速大容量机组。许多现代工业部门，如石油、天然气、矿山等都需要容量高达几千千瓦，转速在6000~9000转/分之间的高速大容量机组。这样的机组如用增速齿轮传动，颇为复杂，价格昂贵。只有采用无换向器电机才能比较经济地满足要求。此外，在某些化工、矿山设备中，例如水泥厂中的大型转窑等需要大容量的低速电机，采用无换向器电机无齿轮传动方式也是比较经济合理的。

近年来为了解决环境污染问题和缓和石油危机，在不少国家正在积极研制电动汽车。其中比较理想的方案是采用斩波器调速的高速无换向器电机。如日本东芝曾试制了几种规格的电动汽车。其中1号试验车BEC-1用的是20千瓦20000转/分的高速无换向器电机；2号试验车BEC-2用的是二台40千瓦16000转/分的无换向器电机^[6]。使用高速电机可以显著缩小电机的体积，减轻汽车的自重。

无换向器电机的适应性不但相当广泛，而且控制也颇为方便。特别是当电机需作四象限运行时，在无换向器电机中，只要改变晶闸管的触发顺序即可，不必采用二个整流桥反并联的方式，这可大大简化控制系统，提高运行的可靠性。

此外，按照晶闸管无换向器电机的工作原理，还可以用来解决大型同步电动机的起动问题。只要给待起动的同步电动机配上一套容量仅为电动机额定容量 5 ~ 10% 的晶闸管变流器及其控制装置，使其形成一台无换向器电机（一般是交-直-交系统，当然也可以是交-交系统），在比较小的起动电流下，一般在几分钟的时间内，可把同步电机起动起来，加速到接近同步速度，然后让电机并入电网，并把变流器切除。同步电动机的这种静止变频起动方式，在国外已在大型鼓风电机、水泵电机和蓄能电站的扬水发电电动机上得到了应用。例如美国 Racoon 电站的 425 兆伏安，403 兆瓦的大型扬水发电机组就是采用无换向器电机方式起动的。所用的晶闸管变流器的容量为 20000 千伏安。

无换向器电机还可作为变频机组，有带动多台普通的异步电机或同步电机进行协同调速运行的能力。由于无换向器电机从实质上讲乃是一种自控式同步电动机的变频调速系统，在调速过程中，在电机的出线端可以得到一个频率可变的交流电压。在电机励磁保持恒定的情况下，其电压和频率几乎成正比例关系。特别是无换向器电机由于本身带有直流励磁，它具有提供无功功率的能力，因之这种变频电源很适宜于带动多台异步电机一起运转。通过调节无换向器电机的转速，也就是电机的频率，可以同时控制多台异步电机，使其协同调速。这种系统在纺织、印染、造纸和传输机械的传动系统中应用具有许多优点。试验研究表明，这种无换向器

电机变频电源还可以用来作为电机试验站的变频机组，馈电给异步电机进行空载、负载、温升试验。可以用一台无换向器电机取代传统的由四台电机组成的变频机组。这不仅可以减小体积，节约投资，而且可以把机组回收能量的效率由一般的60%提高到90%左右。